

Metal Oxide Semiconductor Thin-Film Transistors for Flexible Electronics

Doctoral Thesis**Author(s):**

Petti, Luisa

Publication date:

2016

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010668974>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Metal Oxide Semiconductor Thin-Film Transistors for Flexible Electronics

A dissertation submitted to

ETH ZÜRICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

LUISA PETTI

MSc. Politecnico di Milano

born June 4, 1987

citizen of Italy

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Gerhard Tröster, ETH Zurich, examiner

Prof. Dr. Thomas D. Anthopoulos, Imperial College London,
co-examiner

2016

Abstract

The rapid progress in semiconductor technology is fueled by the growing demand for electronic devices with improved performance, higher integration density, and new functionality. On one side, aspects like electrical performance, feature size, and manufacturing cost are still pushing the development of silicon-based devices, as predicted by Gordon Moore in 1965. On the other side, the quest for increased functionality of electronic devices is calling for alternative technological platforms, providing novel features like flexibility, light-weight, transparency, conformability, stretchability, biocompatibility, and even biodegradability. A new generation of flexible electronics allowing higher functionality of wearable devices and smart textiles, e.g. for sports or healthcare applications, is rapidly expanding. Even disruptive applications like artificial robotic skins or imperceptible implants seem to be possible by embedding thin, soft and flexible electronic systems everywhere.

Among flexible electronic technologies, metal oxide semiconductor thin-film transistors (TFTs) are particularly appealing, owing to their ability to combine optical transparency, carrier mobility larger than $10\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$, low temperature processability, and low sensitivity to mechanical strain. These features, together with the possibility to develop large-area and scalable manufacturing processes, render metal oxide semiconductor TFT technology the most prominent candidate to drive tomorrow's ubiquitous electronics.

In this thesis, metal oxide semiconductor TFTs were fabricated on free-standing $50\text{ }\mu\text{m}$ -thick polyimide foils utilizing a wide range of materials, device structures, and manufacturing processes. Advanced vertical and quasi-vertical geometries were used to realize indium gallium zinc oxide (IGZO) TFTs with 500 nm and 300 nm channel lengths, respectively. Two-photon direct laser writing (DLW) was utilized to fabricate flexible IGZO TFTs with channel lengths down to 280 nm .

For future electronic systems, also memory functionality needs to be integrated on flexible substrates. In particular, memory devices that combine low-power operation and mechanical flexibility are especially attractive. Low-voltage non-volatile memory TFTs with ferroelectric P(VDF-TrFE) gate dielectrics and IGZO active layers were fabricated. The behavior of IGZO memory devices under applied mechanical bending (tensile and compressive strain up to $\pm 0.6\%$) was investigated

and correlated to the piezoelectric properties of P(VDF-TrFE).

An approach for the deposition of metal oxide semiconductors is represented by solution processing techniques, which are much less studied until today. These techniques would further increase the possibilities of large-area and low-cost fabrication methods. In this work, indium oxide (In_2O_3) active layers were grown by ultrasonic spray pyrolysis at 250°C and integrated into flexible n-type TFTs and unipolar logic inverters.

Most common metal oxide semiconductors yield a good electron conduction. To allow the development of a compact and low-power flexible complementary TFT technology, inorganic and organic p-type solution-processable semiconductors were investigated. Especially spin-casted single walled carbon nanotube (SWCNT) devices proved to be a particularly attractive option, owing to their hole effective mobility above $8\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$ and their mechanical flexibility down to 4 mm.

To take advantage of both n-type and p-type TFTs, flexible complementary logic inverters were demonstrated. Complementing n-type IGZO with p-type SWCNTs allowed realizing flexible inverters yielding gains up to 85 V/V, even while bent to a tensile radius of 10 mm. The demonstration of flexible complementary inverters based on fully solution-deposited active layers (spray-coated In_2O_3 and spin-coated SWCNTs) is considered a step towards large-area and solution-processed flexible electronics.

Riassunto

Il rapido progresso delle tecnologie a semiconduttore è alimentato da una crescente richiesta di dispositivi elettronici con migliori prestazioni, maggiore densità d'integrazione e nuove funzionalità. Da un lato, talune caratteristiche come le prestazioni elettroniche, le dimensioni del transistor e i costi di produzione continuano a sollecitare lo sviluppo di dispositivi al silicio, come previsto da Gordon Moore nel 1965. Allo stesso tempo, la domanda di una maggiore funzionalità dei dispositivi elettronici induce a utilizzare piattaforme tecnologiche alternative, che forniscano nuove caratteristiche quali la flessibilità, la leggerezza, la conformabilità, l'elasticità, la biocompatibilità e la biodegradabilità. A tale scopo, è in crescita una nuova generazione di circuiti elettronici flessibili che consentano una maggiore funzionalità dei dispositivi portabili e dei tessuti intelligenti, ad esempio per lo sport o per il settore medico. Sistemi elettronici leggeri e sottili sembrano consentire persino innovazioni futuristiche quali pelle artificiale per robot o addirittura protesi impercettibili.

Una tecnologia elettronica flessibile particolarmente interessante è quella dei transistori a film sottile a semiconduttori di ossido di metallo, che consente di combinare trasparenza ottica, mobilità elettronica maggiore di $10 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, processabilità a basse temperature e bassa sensitività alle tensioni meccaniche. Queste caratteristiche, unite alla possibilità di sviluppare processi di produzione su larga scala, rendono la tecnologia a semiconduttori di ossido di metallo il candidato più promettente per i dispositivi elettronici del futuro.

In questa tesi, transistori a film sottile a ossidi di metallo sono stati fabbricati su un substrato polimmidico flessibile e autoportante ($50 \mu\text{m}$ di spessore) utilizzando una vasta gamma di materiali, di strutture e di processi di fabbricazione. Geometrie verticali e quasi-verticali sono state usate per realizzare transistori a ossido di indio-gallio-zinco (IGZO) aventi lunghezza di canale, rispettivamente, di 500 nm e 300 nm. Inoltre, la scrittura diretta laser è stata utilizzata per fabbricare transistori a IGZO con lunghezza di canale di 280 nm.

Per i sistemi elettronici del futuro, anche le memorie devono essere integrate su substrati flessibili. In particolare, sono particolarmente importanti le memorie che combinano operazione a basso consumo di potenza e flessibilità meccanica. Utilizzando transistori a IGZO con un dielettrico ferroelettrico [P(VDF-TrFE)], sono state realizzate memorie

non volatili a basso voltaggio. Inoltre, è stata studiata la risposta delle memorie a seguito di sollecitazioni meccaniche di trazione e di compressione ($\pm 0.6\%$). I risultati ottenuti sono stati messi in correlazione con le proprietà piezoelettriche del P(VDF-TrFE).

Un metodo interessante (anche se ancora poco studiato) per la crescita dei semiconduttori a ossidi di metallo è rappresentato dall'uso di processi da soluzione. Questa tecnica potrebbe favorire ulteriormente lo sviluppo di metodi di fabbricazione su larga scala e a basso costo. In questa tesi, ossido di indio (In_2O_3) è stato cresciuto mediante pirolisi a spruzzo ultrasonico a 250°C ed integrato in transistori e invertitori unipolari di tipo n.

Comunemente i semiconduttori a ossido di metallo esibiscono una buona conduzione di elettroni. Per poter sviluppare una tecnologia flessibile complementare che sia compatta e a basso consumo di potenza, sono stati investigati anche semiconduttori inorganici e organici di tipo p processabili da soluzione. In particolare, dispositivi a nanotubi di carbonio a parete singola (SWCNT) si sono dimostrati un'opzione interessante per la mobilità di lacuna al di sopra degli $8\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$ e per la flessibilità meccanica fino a 4 mm di raggio di curvatura.

Per sfruttare i vantaggi dei transistori di tipo n e p, sono stati fabbricati invertitori complementari flessibili. Grazie a transistori a IGZO (di tipo n) e SWCNT (di tipo p), è stato possibile realizzare invertitori flessibili aventi un guadagno di 85 V/V e flessibilità meccanica fino ad un raggio di curvatura di 10 mm. La realizzazione di invertitori complementari flessibili con semiconduttori processati da soluzione (In_2O_3 e SWCNTs) rappresenta un passo avanti nello sviluppo dell'elettronica flessibile e processabile da soluzione su larga scala.